

# PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 08-086190

(43)Date of publication of application : 02.04.1996

(51)Int.Cl.

E21D 9/06  
G05B 13/02

(21)Application number : 06-219296

(71)Applicant : NIPPON TELEGR & TELEPH  
CORP <NTT>

(22)Date of filing : 13.09.1994

(72)Inventor : KOTANI TADASHI  
YOSHIDA KOICHI  
TSUJIMURA TAKESHI  
YABUTA TETSUO

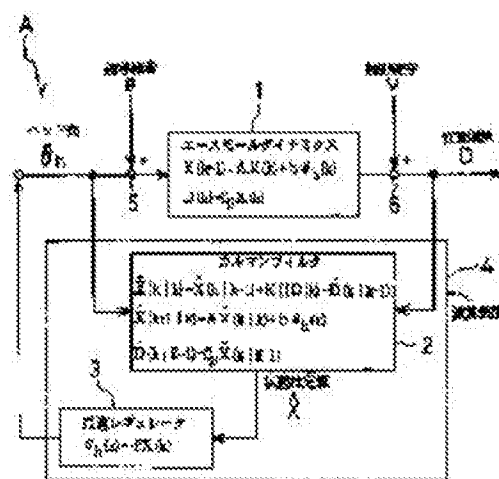
## (54) DIRECTION AND POSITION CONTROL METHOD AND DEVICE FOR TUNNEL ROBOT

(57)Abstract:

**PURPOSE:** To correct a route by measuring a position deviation of an underground propulsion robot to be input to a direction and position control device, and feedbacking a head angle computed according to a designated calculation expression by adding a disturbance factor and a measured noise thereto.

**CONSTITUTION:** At the time of controlling the direction and position of a small bore robot propelled under the ground to construct a non-removed earth pipe line, a position deviation from a planned advancing line is measured from a pressure difference between a pressure sensor in the robot and a pressure sensor on the ground. The measured value is inputted to an

acemole dynamics 1 of a control device A to compute a head angle  $\theta_h$  according to a designated calculation expression. A transition noise produced by soil property change and the like is added to an adder 5 of the input end of the acemole dynamics 1, and an observation noise at the time of measurement is added to an adder 6 of the output end. The current head angle  $\theta_h$  and a position deviation D from a planned



advancing line estimated at the preceding time are taken in an arithmetic device 4 just before the adder 5 and just after the adder 6 to compute a new head angle  $\theta_h$  according to a designated calculation expression to feedback the head angle to the robot main body, thereby changing the route.

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平8-86190

(43) 公開日 平成8年(1996)4月2日

(51) Int.Cl.<sup>5</sup>

E 21 D 9/06

G 05 B 13/02

識別記号

311 D

庁内整理番号

J 9131-3H

F I

技術表示箇所

審査請求 未請求 請求項の数10 O L (全14頁)

(21) 出願番号

特願平6-219296

(22) 出願日

平成6年(1994)9月13日

(71) 出願人 000004226

日本電信電話株式会社

東京都新宿区西新宿三丁目19番2号

(72) 発明者 小谷 忠司

東京都千代田区内幸町1丁目1番6号 日

本電信電話株式会社内

(72) 発明者 吉田 耕一

東京都千代田区内幸町1丁目1番6号 日

本電信電話株式会社内

(72) 発明者 辻村 健

東京都千代田区内幸町1丁目1番6号 日

本電信電話株式会社内

(74) 代理人 弁理士 菅 隆彦

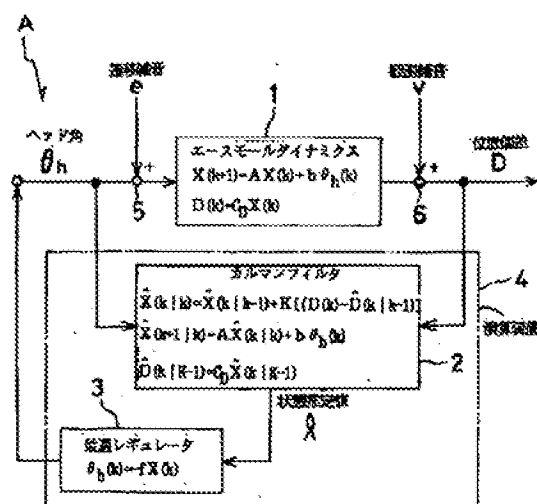
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 トンネルロボットの方向・位置制御方法及び装置

(57) 【要約】

【目的】土質変化などの外乱要因を含むトンネルロボットのダイナミクスと、位置偏差の計測に代表される計測雑音を表現することにより状態フィードバックを含む制御アルゴリズムを合理的に決定できるトンネルロボットの方向・位置制御方法及び装置を提供する。

【構成】トンネルロボットの制御入力であるロボット本体7先端のヘッド14角 $\theta$ 、の制御装置において、ヘッド14角 $\theta$ を入力し、所定計算式に則って演算処理し、位置偏差を出力するエースモールダイナミクス1と、エースモールダイナミクス1の入力端と出力端にそれぞれ遷移雑音 $e$ と観測雑音 $v$ とを加入接続する加算器5、6と、加算器5の直前と加算器6の直後からそれぞれヘッド14角 $\theta$ と位置偏差 $D$ を分岐入力して取込んだロボット本体7の進行計画線 $Y$ からの位置偏差 $D$ により所定計算式に則って演算修正したヘッド14角 $\theta$ をフィードバックする演算装置4と、を具備することを特徴とする。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】土中に押し込み推進させることで無排土式に管路を構築して行く小口径トンネルロボットの、制御入力であるロボット先端のヘッド角を制御するに当り、ロボット本体の計画線からの位置偏差を取り込んで前記ヘッド角を計算する際、

まず、当該ヘッド角を入力とし前記ロボット本体の計画線からの位置偏差を出力とする $n$ 次元の線形離散時間系確率モデルを基に、外部計測によって得られる位置偏差を取り込んで $n$ 次元の状態ベクトルを推定し、

次いで、当該状態ベクトルに $n$ 次元のゲインマトリクスを乗じて前記ヘッド角を計算して状態フィードバック制御し、

あわせて、前記計画線の傾きと、土質変化等による外乱雑音の分散の大きさと、計測雑音の大きさを加味修正することを特徴とするトンネルロボットの方向・位置制御方法。

【請求項2】ヘッド角を制御入力としロボット本体の計画線からの位置偏差の出力は、

その伝達関数として入出力関係を実現する状態空間表現を求め、

$n$ 次元の状態変化ベクトルを制御入力変数（スカラ）を出力変数（スカラ）として状態方程式と出力方程式を考え、1入力1出力の線形時不変システムを構成すること、ことを特徴とする請求項1記載のトンネルロボットの方向・位置制御方法。

【請求項3】 $n$ 次元の線形離散時間系確率モデルは、ロボット本体の姿勢角と水平線が成すピッチング角変化量の時系列項と、

ヘッドの姿勢角と水平線が成すヘッド角の時系列項と、正規分布で近似できる残差の線形結合とで表わされ、各項のパラメータは最小二乗法で推定される、ことを特徴とする請求項1又は2記載のトンネルロボットの方向・位置制御方法。

【請求項4】状態フィードバック制御は、ある時点で測定した位置偏差と、前時点で予測した前記ある時点の出力予測値との差に、カルマンゲインを乗じてフィードバックし、前記前時点で予測した事前推定を補正し、前記ある時点における事後推定値を得る、ことを特徴とする請求項1、2又は3記載のトンネルロボットの方向・位置制御方法。

【請求項5】状態フィードバック制御は、ある時点の事後推定値と、当該事後推定値を用いた状態フィードバックによるヘッド角入力から、次時点の事前推定値と、これに基づく出力予測値を計算する、ことを特徴とする請求項1、2、3又は4記載のトンネルロボットの方向・位置制御方法。

【請求項6】カルマンゲインは、

状態推定値の推定誤差共分散行列を含み、

離散時間型リカッチ方程式を満たし、

位置偏差の観測雑音の分散を含むことを特徴とする請求項4又は5記載のトンネルロボットの方向・位置制御方法。

【請求項7】外乱雑音は、制御入力ヘッド角を入力する時の制御遷移雑音であることを特徴とする請求項1、2、3、4、5又は6記載のトンネルロボットの方向・位置制御方法。

【請求項8】計測雑音は、位置偏差を計測する時の観測雑音であることを特徴とする請求項1、2、3、4、5、6又は7記載のトンネルロボットの方向・位置制御方法。

【請求項9】土中に押し込み推進させることで無排土式に管路を構築して行く小口径トンネルロボットの制御入力であるロボット本体先端のヘッド角の制御装置において、

当該ヘッド角を入力し所定計算式に則って演算処理し位置偏差を出力するエースモールダイナミクスと、

当該エースモールダイナミクスの入力端と出力端にそれぞれ遷移雑音と観測雑音とを加入接続する加算器と、

当該入力端側加算器の直前と当該出力端側加算器の直後からそれぞれ前記ヘッド角と前記位置偏差を分岐入力して取込んだロボット本体の進行計画線からの位置偏差により所定計算式に則って演算修正した前記ヘッド角をフィードバック出力する演算装置と、

を具備することを特徴とするトンネルロボットの方向・位置制御装置。

【請求項10】演算装置は、

ヘッド角を入力とし、ロボット本体の進行計画線からの位置偏差を出力する $n$ 次元の線形離散時間系確率モデルを基に、別途外部計測装置によって得られる位置偏差を取込んで $n$ 次元の状態ベクトルの状態推定値を所定計算式に則り予測演算するカルマンフィルタと、

当該状態ベクトルに $n$ 次元のゲインマトリクスを乗じてヘッド角を演算する最適レギュレータと、

で構成することを特徴とする請求項9記載のトンネルロボットの方向・位置制御装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】本発明は、無排土式で押し込み推進させながらロボット先端のヘッド角を制御し、方向・位置修正を行う小口径トンネルロボットの方向・位置制御方法及びその実施に直接使用する装置に関するものである。

【0002】

【従来の技術】小口径トンネルロボットの方向制御則が多数検討されている。この一例を以下に示す。

（1）計画線に対するロボットの位置偏差とピッチング角度偏差に、ある比例ゲインを掛けたものを次の入力へ

ッド角とするフィードバック制御則。

(2) 計画線に対するロボット本体の位置偏差とピッチング角度偏差とそれに対する入力ヘッド角に関するオペレータの経験と知識を使い、制御規則、メンバーシップ関数で表現し制御するファジィ制御則。

【0003】(3) 所定の方向制御側から得られる、ロボット本体の位置偏差とピッチング角度偏差とそれに対する入力ヘッド角との関係を、学習データとしてニューラルネットワークに学習させ、初期位置偏差および初期ピッチング角度によらない最適フィードバックゲインを得るニューラルネットワーク制御則。これらの制御則は、小口径トンネルロボットの方向制御に有効であることが確認されている。

【0004】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、これらの制御では、それぞれについて、

(1) 初期位置偏差、初期ピッチング角度の変化に対し、最適なフィードバックゲインを試行錯誤的に検索しなくてはならない。

【0005】(2) 初期位置偏差、初期ピッチング角度の変化に対し、最適なファジィ集合代表値を試行錯誤的に検索しなくてはならない。

(3) 任意の初期位置偏差、初期ピッチング角度に対応する最適フィードバックゲインを得るため、所定の制御則の制御出力を学習させる時間が必要という問題点があった。

【0006】以上の問題についての解決法として、

(4) ファジィ方向制御の最適ファジィ集合代表値をニューラルネットワークによってオートチューニングするという方法も取られているが、試行錯誤的に最適フィードバックゲインを探索するという姿勢は同様であり、学習およびオートチューニングの時間が必要という問題点があった。

【0007】従来の技術では、望ましい制御特性を得るためのフィードバックゲインの選定は試行錯誤的であり、土質が変化すれば新たにゲインの選定、又は学習を行わねばならなかった。また、任意の計画線の傾きで制御できるものではなかった。

【0008】ここにおいて、本発明の主要な解決すべき目的は、次の通りである。本発明の第1の目的は、トンネルロボットの入出力モデルから求めたn次元線形離散値型確率システムを用いたトンネルロボットの方向・位置制御方法及び装置を提供せんとするものである。

【0009】本発明の第2の目的は、土質変化などの外乱要因(外乱要因は雑音と扱うことができる)を含んだトンネルロボットのダイナミクスと、位置偏差の計測に代表される計測の雑音とを表現するトンネルロボットの方向・位置制御方法及び装置を提供せんとするものである。

【0010】本発明の第3の目的は、状態フィードバック

クを含む制御アルゴリズムを合理的に決定できるトンネルロボットの方向・位置制御方法及び装置を提供せんとするものである。

【0011】本発明のその他の目的は、明細書、図面、特に特許請求の範囲の記載から自づと明らかとなろう。

【0012】

【課題を解決するための手段】前記課題の解決は、本発明が次に列挙する新規な特徴的手法及び手段を採用することにより達成される。即ち、本発明方法の第1の特徴は、土中に押し込み推進させることで無排土式に管路を構築して行く小口径トンネルロボットの、制御入力であるロボット先端のヘッド角を制御するに当たり、ロボット本体の計画線からの位置偏差を取り込んで前記ヘッド角を計算する際、まず、当該ヘッド角を入力とし前記ロボット本体の計画線からの位置偏差を取り込んでn次元の線形離散時間系確率モデルを基に、外部計測によって得られる位置偏差を取り込んでn次元の状態ベクトルを推定し、次いで、当該状態ベクトルにn次元のゲインマトリクスを乗じて前記ヘッド角を計算して、状態フィードバック制御し、あわせて、前記計画線の傾きと、土質変化等による外乱雑音の分散の大きさと計測雑音の大きさを加味修正してなるトンネルロボットの方向・位置制御方法である。

【0013】本発明方法の第2の特徴は、前記本発明方法の第1の特徴におけるヘッド角を制御入力としロボット本体の計画線からの位置偏差の出力が、その伝達関数として入出力関係を実現する状態空間表現を求めるため、n次元の状態変化ベクトルを制御入力変数(スカラー)を出力変数(スカラー)として状態方程式と出力方程式を考え、1入力1出力の線形時不変システムを構成してなるトンネルロボットの方向・位置制御方法である。

【0014】本発明方法の第3の特徴は、前記本発明方法の第1又は第2の特徴におけるn次元の線形離散時間系確率モデルが、ロボット本体の姿勢角と水平線が成すピッチング角変化量の時系列項と、ヘッドの姿勢角と水平線が成すヘッド角の時系列項と、正規分布で近似できる残差の線形結合とで表わされ、各項のパラメータは最小二乗法で推定されてなるトンネルロボットの方向・位置制御方法である。

【0015】本発明方法の第4の特徴は、前記本発明方法の第1、第2又は第3の特徴における状態フィードバック制御が、ある時点で測定した位置偏差と、前時点で予測した前記ある時点の出力予測値との差に、カルマンゲインを乗じてフィードバックし、前記前時点で予測した事前推定を補正し、前記ある時点における事後推定値を得てなるトンネルロボットの方向・位置制御方法である。

【0016】本発明方法の第5の特徴は、前記本発明方法の第1、第2、第3又は第4の特徴における状態フィードバック制御が、ある時点の事後推定値と、当該事後

推定値を用いた状態フィードバックによるヘッド角入力から、次時点の事前推定値と、これに基づく出力予測値を計算してなるトンネルロボットの方向・位置制御方法である。

【0017】本発明方法の第6の特徴は、前記本発明方法の第4又は第5の特徴におけるカルマンゲインが、状態推定値の推定誤差共分散行列を含み、離散時間型リカッチ方程式を満たし、位置偏差の観測雑音の分散を含んでなるトンネルロボットの方向・位置制御方法である。

【0018】本発明方法の第7の特徴は、前記本発明方法の第1、第2、第3、第4、第5又は第6の特徴における外乱雑音が、制御入力ヘッド角を入力する時の制御遷移雑音であるトンネルロボットの方向・位置制御方法である。

【0019】本発明方法の第8の特徴は、前記本発明方法の第1、第2、第3、第4、第5、第6又は第7の特徴における計測雑音が、位置偏差を計測する時の観測雑音であるトンネルロボットの方向・位置制御方法である。

【0020】本発明装置の第1の特徴は、土中に押し込み推進させることで無排土式に管路を構築していく小口径トンネルロボットの制御入力であるロボット本体先端のヘッド角の制御装置において、当該ヘッド角を入力し所定計算式に則って演算処理し位置偏差を出力するエースモールダイナミクスと、当該エースモールダイナミクスの入力端と出力端にそれぞれ遷移雑音と観測雑音とを加入接続する加算器と、当該入力端側加算器の直前と当該出力端側加算器の直後からそれぞれ前記ヘッド角と前記位置偏差を分岐入力して取込んだロボット本体の進行計画線からの位置偏差により所定計算式に則って演算修正した前記ヘッド角をフィードバック出力する演算装置と、を具備してなるトンネルロボットの方向・位置制御装置である。

【0021】本発明装置の第2の特徴は、前記本発明装置の第1の特徴における演算装置が、ヘッド角を入力とし、ロボット本体の進行計画線からの位置偏差を出力するn次元の線形離散時間系確率モデルを基に、別途外部計測装置によって得られる位置偏差を取込んでn次元の状態ベクトルの状態推定値を所定計算式に則り予測演算するカルマンフィルタと、当該状態ベクトルにn次元のゲインマトリクスを乗じてヘッド角を演算する最適レギュレータと、で構成してなるトンネルロボットの方向・位置制御装置である。

【0022】

【作用】本発明は、前記の新規な手法及び手段を講じたので、ロボット先端のヘッド角の制御において、ロボット

$$\begin{aligned} \Delta \theta_p(k+1) = & a_1 \Delta \theta_p(k) + a_2 \Delta \theta_p(k-1) + a_3 \Delta \theta_p(k-2) \\ & + b_0 \theta_h(k) + b_1 \theta_h(k-1) + b_2 \theta_h(k-2) + b_3 \theta_h(k-3) + c(k) \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、 $\Delta \theta$ 、 $[\quad]$ はロボット本体7の姿勢角と水平線が成すピッチング角 $\theta$ 、の変化量（以後ピッチング

\*ト本体の計画線からの位置偏差を取り込んでヘッド角を計算する場合、その演算装置の計算アルゴリズムを計画線の傾きと、土質変化などの外乱雑音の分散の大きさと、計測雑音の分散の大きさによって変更するものである。

【0023】

【実施例】

（装置例）以下に図面を参照して本発明の装置例を説明する。図1は本装置例の制御系ブロック線図、図2は本装置例を装備使用したトンネルロボットのシステム構成を示す図である。図中、Aは本装置例のトンネルロボットの方向・位置制御装置、1はエースモールダイナミクス、2はカルマンフィルタ、3は最適レギュレータ、4は演算装置、5、6は加算器である。この状態推定カルマンフィルタ2と最適レギュレータ3とは演算装置4を構成する。

【0024】トンネルロボットのシステムBは、ヘッド角修正機能を持つトンネルロボット本体7、埋設管8、埋設管8を押し込む押管装置9、油圧装置10、操作盤11よりなる。図中、12はオペレータ、13は地表、14はヘッドである。埋設管8は押管装置9より油圧で一本づつ押し込まれる。このとき、オペレータ12はヘッド14角を逐次修正し、計画線Yに沿うように方向制御を行う。この方向制御は従来オペレータの経験と知識に頼っていた。

【0025】（方法例）当該本装置例に適用する本発明の方法例の処理手順を図面につき説明する。図3は本方法例が利用するトンネルロボットの垂直位置計測法を実行する位置検知装置を示す図であり、シリコンタンク15によりシリコンホース16に供給されるシリコン油のホース16両端での液圧差を、先端トンネルロボット内圧力センサ17と地上基準圧力センサ18により測定し、地表13の測定基準面19からの垂直位置を得るものである。

【0026】以下に、この垂直位置計測法によって得られるロボット本体7の計画線Yからの位置偏差を取り込んで、制御量であるヘッド14角を演算する、“エースモール”と呼称され、実用化されている小口径トンネルロボットについての方向・位置制御法の実行手順について説明する。

【0027】制御対象としてエースモールダイナミクス1（エースモールのダイナミクスモデル）が次の差分方程式で与えられているものとする。

【数1】

角変化量 $\Delta \theta$ 、と呼ぶ）、 $\theta$ 、 $[\quad]$ はヘッド1【外1】

4角、 $e(k)$  [°] は残差 (平均値0、分散 $\sigma^2$ ) を表わしている。この定義を図

4 (a) (b) にそれぞれ示す。

\* 角変化量 $\Delta\theta$ 、の時系列項、ヘッド14角の時系列項、

【0028】このモデル固定は特開平3-140599 およ

号公報に開示されており、ロボット本体7のピッチング\* 【外2】

び正規分布で近似出来る残差 $e(k)$ の線形結合によってエースモールのダイナミ

クスを表わすもので、各項のパラメータは最小二乗法に  
よって推定される。

$$\frac{\Delta\theta_p}{\theta_h} = \frac{b_0 z^3 - b_1 z^2 - b_2 z + b_3}{z^4 - a_1 z^3 - a_2 z^2 - a_3 z} \quad \dots (2)$$

【0029】

【外3】

この(1)式から残差 $e(k)$ を除いた式を $z$ 変換すると、  
 $\theta_s(k+r) \rightarrow z^r \theta_s(z)$  等のように変換されるから、  
整理して次の式を得る。

10 【0030】一方、図5に示すように位置 $Y(k)$ と、偏  
角 $\theta_s(k)$ 、計測線 $Y_s$ の傾き $\theta_d$ の関係は次式で表わ  
される。

【数3】

【数2】

$$\begin{aligned} Y(k) &= Y(k-1) + L \sin \theta_s(k-1) \\ &= Y(k-1) + L \sin(\theta_d + \theta_s(k-1)) \\ &= Y(k-1) + L (\sin \theta_d \cos \theta_s(k-1) + \cos \theta_d \sin \theta_s(k-1)) \end{aligned} \quad \dots (3)$$

上式は、 $\theta_s(k)$ が微小角であることを考慮すれば次の  
結果を得る。 ★【数4】

★20

$$Y(k) = Y(k-1) + L \{ \sin \theta_d + (\pi/180) \theta_s(k-1) \cos \theta_d \} \quad \dots (4)$$

【0031】ここで $L \sin \theta_d = Y_s(k) - Y_s(k-1)$ を  
考慮すれば、計測線 $Y_s$ からの偏差を $D(k) = Y(k) - Y$   
 $s(k)$ と定義して次式を得る。

☆【数7】

$$\theta_s(k) = \theta_s(k-1) + \Delta\theta_p(k) \quad \dots (7)$$

【数5】

$$D(k) = D(k-1) + L \cos \theta_d \theta_s(k-1) \pi / 180 \quad \dots (5)$$

$z$ 変換して、次に結果を得る。

【数8】

$$\frac{\theta_s}{\Delta\theta_p} = \frac{z}{z-1} \quad \dots (8)$$

両辺を $z$ 変換して整理すれば、次のようになる。

【数6】

$$\frac{D}{\theta_s} = \frac{L \cos \theta_d}{z-1} \cdot \frac{\pi}{180} \quad \dots (6)$$

30

【0033】従って、ヘッド角 $\theta_s$ から位置偏差 $D$ およ  
び偏角 $\theta_s$ への伝達関数はそれぞれ次のように表わせ  
る。

【数9】

【0032】また、ピッチング角変化量 $\Delta\theta$ と偏角 $\theta$   
との間に次の関係が成り立つ。 ☆

$$\frac{\theta_s}{\theta_h} = \frac{\theta_s}{\Delta\theta_p} \cdot \frac{\Delta\theta_p}{\theta_h} = \frac{b_0 z^3 - b_1 z^2 - b_2 z + b_3}{(z-1)(z^3 - a_1 z^2 - a_2 z - a_3)} \quad \dots (9)$$

$$\frac{D}{\theta_h} = \frac{D}{\theta_s} \cdot \frac{\theta_s}{\theta_h} = \frac{\pi L \cos \theta_d (b_0 z^3 - b_1 z^2 - b_2 z + b_3)}{180 (z-1)^2 (z^3 - a_1 z^2 - a_2 z - a_3)} \quad \dots (10)$$

【0034】ここで、上記の入出力関係を実現する状態  
空間表現を求める。 $X$ を $n$ 次元の状態変数ベクトル $[x$   
 $1, x_2, \dots, x_n]^T$ 、 $u$ を制御入力変数(スカ  
ラ)、 $y$ を制御出力変数(スカラ)として次のような状  
態方程式と出力方程式を考え、1入力1出力の線形時不  
変システムを構成する。

【数10】

$$\begin{aligned} X(k+1) &= A X(k) + b u(k) \\ y(k) &= c X(k) \end{aligned} \quad \dots (11)$$

【0035】ただし、

【数11】

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & & \\ \vdots & & & \ddots & \\ \vdots & & & & 0 & 1 \\ -\alpha_n & -\alpha_{n-1} & \dots & \dots & -\alpha_1 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$c = [\beta_n \quad \beta_{n-1} \quad \dots \quad \beta_1]$$

【0036】 $z$ 変換して両辺を比較すれば、 \* \* 【数12】

$$\begin{aligned} zX_1(z) &= X_2(z) \\ zX_2(z) &= X_3(z) \\ &\vdots \\ zX_{n-1}(z) &= X_n(z) \\ zX_n(z) &= -\alpha_n X_1(z) - \alpha_{n-1} X_2(z) - \dots - \alpha_1 X_n(z) + u(z) \end{aligned}$$

となる。 \* 【数13】

【0037】以上を整理すれば、次の式を得る。 \*

$$(z^n + \alpha_1 z^{n-1} + \alpha_2 z^{n-2} + \dots + \alpha_n) X_1(z) = u(z) \quad \dots (12)$$

同様に、出力式について整理して次式を得る。

20★【0038】 $X_1(z)$ を消去して $u(z)$ から $y(z)$ への伝達関数 $G(z)$ を求めれば次のようになる。

【数14】

$$y(z) = (\beta_1 z^{n-1} + \beta_2 z^{n-2} + \dots + \beta_n) X_1(z) \quad \dots (13) \quad \text{【数15】}$$

$$G(z) = \frac{y(z)}{u(z)} = \frac{(\beta_1 z^{n-1} + \beta_2 z^{n-2} + \dots + \beta_n)}{(z^n + \alpha_1 z^{n-1} + \alpha_2 z^{n-2} + \dots + \alpha_n)} \quad \dots (14)$$

従って、伝達関数 $D/\theta_s$ を状態空間表現で表すため ☆【0039】このとき、 $n=5$ となり、 $D/\theta_s$ の状態空間表現 $(A, b, c)$ が次のように決定される。

式と(14)式の分母・分子が一致するように $\alpha_i, \beta$  【数16】

( $i=1 \sim n$ )を選ばばよい。 ☆30

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_5 & a_2 - 2a_3 & a_1 - 2a_2 + a_3 & -1 - 2a_1 + a_2 & a_1 + 2 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$c_D = \begin{bmatrix} \frac{b_3 \pi L \cos \theta_d}{180} & \frac{b_2 \pi L \cos \theta_d}{180} & \frac{b_1 \pi L \cos \theta_d}{180} & \frac{b_0 \pi L \cos \theta_d}{180} & 0 \end{bmatrix} \quad \dots (15)$$

【0040】一方、 $\theta_s/\theta_s$ の分子・分母に $(z-1)$  ◆【数17】

1)を乗じれば、 ◆

$$\frac{\theta_s}{\theta_s} = \frac{(z-1)(b_0 z^3 - b_1 z^2 - b_2 z + b_3)}{(z-1)^2(z^3 - a_1 z^2 - a_2 z - a_3)} \quad \dots (16)$$

となり、分母が $D/\theta_s$ と一致する。従って、状態方程 \* 【0041】

式は同じで出力方程式が異なることになる。 \* 【外4】

(9)式の分子と比較して $\theta_s$ を出力する $c_{\theta_s}$ が次のように与えられる。



【数18】

$$c_{\theta_s} = [-b_3 \quad -b_2 + b_3 \quad -b_1 + b_2 \quad -b_0 + b_1 \quad b_0] \quad \dots (17)$$

最終的にDと $\theta_s$ を出力とする5次元の1入力2出力システムが次のように与えられる。

【数19】

$$X(k+1) = AX(k) + b\theta_s(k)$$

$$\begin{bmatrix} D(k) \\ \theta_s(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_D \\ c_{\theta_s} \end{bmatrix} X(k) \quad \dots (18)$$

【0042】伝達関数D/ $\theta_s$ 、 $\theta_s$ / $\theta_s$ は共に少なくとも $z=1$ という不安定な運動モードを持っており、安定な方向・位置制御のためには状態量に関するフィードバックが必要となる。従来までは、位置と偏差に関して試行錯誤的に求めたフィードバックゲインを用いていたが、 $a_1$ 、 $b$ 等のシステムパラメータが変化すれば\*

\*再びゲインを決定し直さねばならなかった。前節で求めた状態空間表現に最適レギュレータ3を適用することにより、状態量や制御量に関する2次形式評価関数を最適化する安定なフィードバックループを形成できる。

【0043】評価関数は、出力変数の収束を速めたり、あるいは制御に要する入力をできる限り小さくする等設計者の要望に合わせて設定可能であり、次の形で与えられる。

【数20】

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} \{X(k)^T Q X(k) + r\theta_s(k)^2\} \quad \dots (19)$$

ここで、Qは状態に関する重み行列で、 $r(>0)$ は入力に対する重みである。一般にQを大きくするほど制御入力を抑制することができる。

【0044】特に出力のみを評価したい場合には、

【数21】

$$\begin{aligned} J &= \sum_{k=0}^{\infty} \{q_d D(k)^2 + q_{\theta_s} \theta_s(k)^2 + r\theta_s(k)^2\} \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \left\{ \begin{bmatrix} D(k) & \theta_s(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_d & 0 \\ 0 & q_{\theta_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D(k) \\ \theta_s(k) \end{bmatrix} + r\theta_s(k)^2 \right\} \quad \dots (20) \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \left\{ X(k)^T \begin{bmatrix} c_D^T & c_{\theta_s}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_d & 0 \\ 0 & q_{\theta_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_D \\ c_{\theta_s} \end{bmatrix} X(k) + r\theta_s(k)^2 \right\} \end{aligned}$$

と書けるので、

【数22】

$$Q = \begin{bmatrix} c_D^T & c_{\theta_s}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_d & 0 \\ 0 & q_{\theta_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_D \\ c_{\theta_s} \end{bmatrix} \quad \dots (21)$$

※とおけばよい。

【0045】2次形式評価関数Jを最適化する状態フィードバックは以下のように入力される。

【数23】

$$\theta_s(k) = -fX(k); f = (r + b^T P b)^{-1} b^T P A \quad \dots (22)$$

ただし、Pは離散型リカッチ方程式

★ ★ 【数24】

$$P = Q + A^T P A - A^T P b (r + b^T P b)^{-1} b^T P A \quad \dots (23)$$

を満たす正定行列である。

☆手順で解くことができる。1)  $P(0) = 0$ とおく。

【0046】Q、rを設定すればリカッチ方程式は次の☆40 【数25】

$$ii) P(i+1) = Q + A^T P(i) A - A^T P(i) b (r + b^T P(i) b)^{-1} b^T P(i) A$$

をくり返し計算してその定常解をPとする。

◆これらの信号は観測されるとき雑音に汚されている。

【0047】(22)式による状態フィードバックを行うためには状態ベクトルX(k)が測定可能でなければならないが、実システムにおいて知り得るのは出力位置偏差D(k)、偏角 $\theta_s$ のみであり、実システムにおける◆

【0048】状態空間表現に白色ガウス雑音の項を加え、(18)式で表現できない

【外5】

(1)式の残差 $e(k)$ に該当する制御の外乱雑音も補正できるようにした上で、

カルマンフィルタ2による状態推定器を構成すれば、雑音に汚された出力から状態ベクトルを推定することが可

能である。ただし、位置偏差D(k)は偏角 $\theta_s$ から積分要素を介して出力される信号であるため、偏角 $\theta_s$ から

ではすべての状態変数を推定することはできない。従って、ここでは位置偏差D(k)からカルマンフィルタ2を構成する。

(1)式、(6)式および(8)式より、残差e(k)と偏差D(k)の伝達関数は

$$D = \frac{(\pi L \cos \theta_d / 180) z^3}{(z-1)^2 (z^3 - a_1 z^2 - a_2 z - a_3)} \quad \text{【数26】}$$

それ故、(1)式のヘッド角 $\theta_h$ 入力に対し、残差e(k)の次数を考慮し、

(18)式のダイナミクスに遷移雑音e(k)、観測雑音v(k)を加えた次のモデルを得る。

$$\begin{aligned} X(k+1) &= A X(k) + b \theta_h(k) + g e(k) \\ D(k) &= c_D X(k) + v(k) \end{aligned} \quad \text{... (24)}$$

$$g = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \pi L \cos \theta_d / 180 \end{bmatrix}$$

【外8】

ここで、 $\theta_h(k)$  [°] は制御入力ヘッド角 $\theta_h$ を入力する時の制御の制御雑音

、v(k) [mm] は偏差Dを計測する時の観測雑音を表わしている。

このシステムは定常線形であるから、両雑音e(k)、v(k)を互いに独立な平

【外10】

均値が0、分散がそれぞれ $\sigma_e^2$ 、 $\sigma_v^2$ のガウス白色雑音過程と仮定すると、

【外11】

X(k)の推定値を $\hat{X}(k)$ とおいて、X(k)の推定に次の定常カルマンフィルタのア

ルゴリズムが適用できる。

$$\hat{X}(k|k) = \hat{X}(k|k-1) + K [D(k) - \hat{D}(k|k-1)] \quad \text{... (25)}$$

$$\begin{aligned} \hat{X}(k+1|k) &= A \hat{X}(k|k) + b \theta_h(k) \\ \hat{D}(k+1|k) &= c_D \hat{X}(k+1|k) \end{aligned} \quad \text{... (26)}$$

(k)と、時点k-1で予測した時点kの出力予測値 $\hat{D}(k|k-1)$ との差に、カルマンゲインKを乗じてフィードバックし、

【外13】

時点k-1で予測した事前推定値 $\hat{X}(k|k-1)$ を補正し、時点kにおける事後推定値

【外14】

15

16

 $\hat{X}(k|k)$ を得る。

\* 【0053】

\* 【外15】

(26)式では時点kの事後推定値 $\hat{X}(k|k)$ と、この事後推定値を用いた状態フィードバックによるヘッド角入力 $\theta_r(k)$ から、次の ※ 【外16】

時点k+1での予測値すな

※

わち事前推定値 $\hat{X}(k+1|k)$ と、これに基づく出力予測値 $\hat{D}(k+1|k)$ を計算する。

【外17】

この $\hat{X}(k+1|k)$ と $\hat{D}(k+1|k)$ は、次の時点k+1に進んだとき $\hat{X}(k|k-1)$ 、

【外18】

★ 【数29】

 $\hat{D}(k|k-1)$ となる。

$$K = \Sigma c_D^T / [c_D \Sigma c_D^T + \sigma_v] \quad \dots (27)$$

【0054】カルマンゲインKは、以下のように与えら ※ 【外19】

れる。

★

ただし、 $\Sigma$ は状態推定値 $\hat{X}(k)$ の推定誤差共分散行列であり、離散時間型リ

カッチ方程式

☆ ☆ 【数30】

$$\Sigma = A(\Sigma - \Sigma c_D^T c_D \Sigma / [c_D \Sigma c_D^T + \sigma_v])A^T + g \sigma_g g^T \quad \dots (28)$$

を満たす。

◆ 【外20】

【0055】

◆

 $\sigma_g^2$ 、 $\sigma_v^2$ が与えられればリカッチ方程式は次の手順で解くことができる。i)  $\Sigma(0) = 0$ とおく。

\* \* 【数31】

$$ii) \Sigma(i+1) = A(\Sigma(i) - \Sigma(i) c_D^T c_D \Sigma(i) / [c_D \Sigma(i) c_D^T + \sigma_v])A^T + g \sigma_g g^T$$

をくり返し計算してその定常解を $\Sigma$ とする。このカルマ  
ンフィルタによって推定された状態ベクトルを最適レギ  
ュレータ3の状態ベクトルとしてフィードバックすれば  
よい。※ 実験データの例を考える。このとき、エースモールのピッ  
チング角変化量 $\Delta \theta$ 、とヘッド角 $\theta$ に関するエースモ  
ールダイナミクス1の各パラメータは次のように与えら  
れる。

【0056】(実験例)次に設計例として実際の施工実 ※ 【数32】

$$a_1 = 0.168, a_2 = 0.113, a_3 = 0.093$$

$$b_0 = -0.043, b_1 = 0.120, b_2 = -0.010, b_3 = -0.023 \quad \dots (29)$$

$$\bar{e} = 0, \sigma_e^2 = 0.0190$$

【外21】

ここでは残差の平均値、 $\sigma_e^2$ はその分散をあらわす。m]、計画線Y<sub>0</sub>の傾きを $\theta_0 = [^\circ]$ とした場合の状  
態変数表現は次のように求められる。

40 【数33】

【0057】1ストロークの長さを $l = 450$  [m]

$$X(k+1) = A X(k) + b \theta_s(k) + g e(k)$$

$$\begin{bmatrix} D(k) \\ \theta_s(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_D \\ c_{\theta_s} \end{bmatrix} X(k) + v(k) \quad \dots (30)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.093 & -0.073 & 0.035 & -1.228 & 2.168 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad g = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$c_D = [-0.181 \quad -0.0785 \quad 0.942 \quad -0.338 \quad 0]$$

$$c_{\theta_s} = [0.023 \quad -0.013 \quad -0.013 \quad 0.163 \quad -0.043]$$

【0058】次に最適レギュレータ3を構成する重み行列選定の一例として次のような見積もりを行う。例えば、位置偏差Dと偏角 $\theta_s$ の収束誤差をそれぞれ1[m]、0.1[°]程度とし、またヘッド角 $\theta_h$ の絶対値が最大±1.5[°]と限られているため少なくとも出力誤差の範囲内ではヘッド角 $\theta_h$ の変動幅を0.1[°]程度を許容するものとすれば、評価関数中の各要素の比率は次のようになる。

【数34】

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} \{ q_D D(k)^2 + q_{\theta_s} \theta_s(k)^2 + r e(k)^2 \}$$

$$q_D : q_{\theta_s} \times 10^{-4} : r \times 10^{-4}$$

\*【0059】各要素を等しく評価したければ、各重み変数を次のようにおけばよい。

【数35】

$$q_D = 1, q_{\theta_s} = 10^4, r = 10^4$$

このとき、重み行列Qは次のように与えられる。

【数36】

$$Q = \begin{bmatrix} c_D^T & c_{\theta_s}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_D & 0 \\ 0 & q_{\theta_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_D \\ c_{\theta_s} \end{bmatrix} \quad *30$$

$$= \begin{bmatrix} 5.32 & -2.98 & -30.1 & 37.6 & -9.89 \\ -2.98 & 1.70 & 16.8 & -21.2 & 5.59 \\ -30.1 & 16.8 & 169.9 & -212.2 & 55.9 \\ 37.6 & -21.2 & -212.2 & 265.8 & -70.1 \\ -9.89 & 5.59 & 55.9 & -70.1 & 18.49 \end{bmatrix} \quad \dots (31)$$

【0060】重み行列Qとrを用いて(23)式のリカッチ方程式を解けば200回のくり返し計算の後、次の※

※収束解Pを得る。

【数37】

$$P = \begin{bmatrix} 15.37 & -2.98 & -23.28 & -85.0 & 98.5 \\ -2.84 & 9.74 & 11.35 & -54.8 & 36.8 \\ -23.3 & 11.35 & 183.2 & -287.0 & 117.1 \\ -85.0 & -54.8 & -287.0 & 1933.0 & -1542.0 \\ 98.5 & 36.8 & 117.1 & -1542.0 & 1324.1 \end{bmatrix} \quad \dots (32)$$

【0061】最終的に最適レギュレータ3のフィードバックゲインが次のように計算される。

【数38】

$$f = (r + b^T P b)^{-1} b^T P A \\ = [0.0114 \quad 0.000247 \quad 0.0076 \quad -0.139 \quad 0.123] \quad \dots (33)$$

【0062】また、カルマンフィルタ2のゲインKは \* 【外22】

(29) 式と位置偏差Dの観測雑音の \*

分散 $\sigma_v^2=1$ と定めて、 $\Sigma(0)=0$ とおき、(28)式の200回のくり返しによ

【外23】

り、状態量推定値 $\hat{x}(k)$ の推定誤差共分散行列 $\Sigma$ が次のように求められ、

【数39】

$$\Sigma = \begin{bmatrix} 2.37 & 3.32 & 4.70 & 6.20 & 7.78 \\ 3.32 & 6.16 & 9.99 & 14.2 & 18.7 \\ 4.70 & 9.99 & 17.9 & 26.7 & 36.1 \\ 6.20 & 14.2 & 26.7 & 41.6 & 57.8 \\ 7.78 & 18.7 & 36.1 & 57.8 & 82.5 \end{bmatrix} \quad \dots (34)$$

【0063】最終的にカルマンゲインKは次のように計 20※  
算される。

【数40】

$$K = \Sigma c_D^T / [c_D^T \Sigma c_D^T + \sigma_v] \\ = \begin{bmatrix} 0.499 \\ 1.07 \\ 1.88 \\ 2.68 \\ 3.52 \end{bmatrix} \quad \dots (35)$$

【0066】また(30)式と(36)式を考慮すれば  
【数43】

$$\theta_s(0) = \theta_s(1) = \theta_s(2) = \theta_s(3)$$

$$D(0) = c_D \hat{x}(0)$$

$$\theta_s(0) = c_{\theta_s} \hat{x}(0)$$

$$\theta_s(1) = c_{\theta_s} A \hat{x}(0)$$

$$\theta_s(2) = c_{\theta_s} A^2 \hat{x}(0)$$

$$\theta_s(3) = c_{\theta_s} A^3 \hat{x}(0)$$

30

【0064】カルマンフィルタ2を用いて状態ベクトル  
を推定するときには初期状態ベクトルを選ばなければなら  
ない。推定値が速やかに収束するためには推定誤差が  
小さいことが望ましいので次のような見積もりを行う。(1) 式のダイナミクスが意味を持つのは $k=3$ 以降で  
あるので、少なくとも

【数41】

$$\theta_s(0) = \theta_s(1) = \theta_s(2) = 0 \quad \dots (36)$$

40

$$\Delta \theta_p(0) = \Delta \theta_p(1) = \Delta \theta_p(2) = \Delta \theta_p(3) = 0 \quad \dots (37)$$

となる。

【0067】以上を整理すれば、

【数44】

$$\begin{bmatrix} D(0) \\ \theta_s(0) \\ \theta_s(1) \\ \theta_s(2) \\ \theta_s(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_D \\ c_{\theta_s} \\ c_{\theta_s} A \\ c_{\theta_s} A^2 \\ c_{\theta_s} A^3 \end{bmatrix} \hat{x}(0) \quad \dots (38)$$

【0065】これは(1)式を用いてシミュレーション  
を行う場合の初期条件とも考えられる。このとき(7)  
式と(37)式を考慮すれば、

【数42】

※

よって、次のように $\hat{x}(0)$ について解いてカルマンフィルタ2の推定ベクトル

の初期値とすればよい。

50 【数45】

を得る。

【0068】

【外24】

$$\hat{X}(0) = \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 A \\ c_3 A^2 \\ c_4 A^3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} D(0) \\ \theta_1(0) \\ \theta_1(1) \\ \theta_1(2) \\ \theta_1(3) \end{bmatrix} \quad \dots (39)$$

図6 (a), (b), (c) は位置の初期偏差を  $D(0) = 500$  [mm], 偏角の初期値を  $\theta_1 = -1.5$  [°], 遷移雑音  $e$  および偏差  $D$  の観測雑音無し、とおいた場合のシミュレーション結果である。図7 (a), (b), (c) は位置の初期偏差を  $D(0) = 500$  [mm], 偏角の初期値を  $\theta_1 = -1.5$  [°], 遷移雑音  $e$  [°] を平均値0分散0.13, 偏差  $D$  [mm] の観測雑音を平均値0分散1、とおいた場合のシミュレーション結果である。

【0069】

【発明の効果】かくして、本発明によれば、従来試行錯誤的に検索して来た望ましい制御特性を得るためのフィードバックゲインの選定を、トンネルロボットの入力モデルから求めた  $n$  次元線形離散型確率システムを用いて、土質変化などの外乱要因（雑音）を含んだトンネルロボットのダイナミクスと、位置偏差の計測に代表される計測の雑音を表現することにより状態フィードバックを含む制御アルゴリズムで合理的に決定できることになった。

【0070】また、装置的には、ヘッド角制御入力から位置偏差を制御出力する主制御系のエースモールダイナミクスに対し、カルマンフィルタと最適レギュレータとからなる演算装置をフィードバック系に設け、トンネルロボットのシステムに簡易に取り入れ可能とする等優れた効果を奏する。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の装置例を示す最適レギュレータとカルマンフィルタを含む制御系のブロック線図である。 \*

\* 【図2】 同上を装備使用したトンネルロボットのシステム構成を示す図である。

【図3】 本発明が利用するトンネルロボットの垂直位置計測法を実行する位置検知装置を示す図である。

【図4】 (a) (b) はそれぞれ本発明の方法例におけるヘッド角とピッチング角の定義の一例を示す図である。

【図5】 同上における位置  $Y(k)$  と偏角  $\theta_1(k)$  との関係を示す図である。

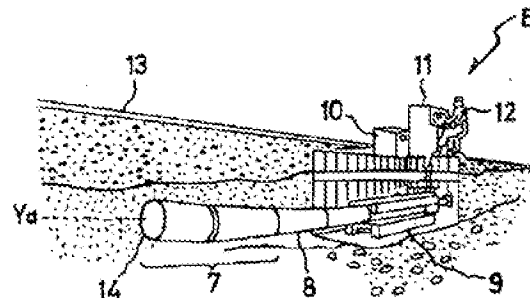
【図6】 (a) (b) (c) は、本発明の実験例における位置偏差、偏角、ヘッド角のシミュレーション結果をそれぞれ示す図である。

【図7】 (a) (b) (c) は、同上における雑音を付加した場合の位置偏差、偏角、ヘッド角のシミュレーション結果をそれぞれ示す図である。

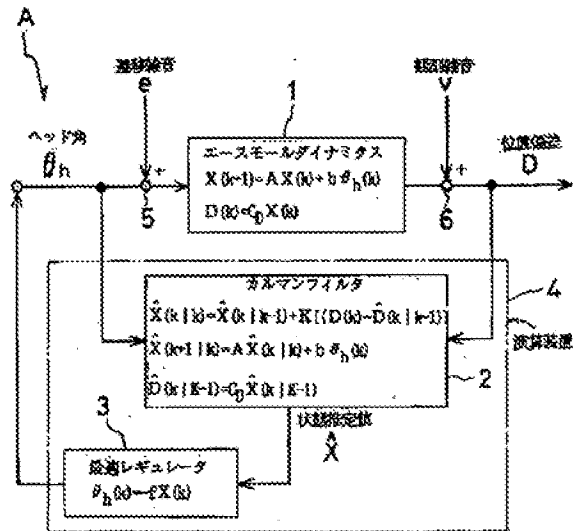
【符号の説明】

- A…トンネルロボットの方角・位置制御装置
- B…トンネルロボットシステム
- 1…エースモールダイナミクス
- 2…カルマンフィルタ
- 3…最適レギュレータ（状態フィードバック制御器）
- 4…演算装置
- 5、6…加算器
- 7…トンネルロボット本体
- 8…埋設管
- 9…押管装置
- 10…油圧装置
- 11…操作盤
- 12…オペレータ
- 13…地表
- 14…ヘッド
- 15…シリコンタンク
- 16…シリコンホース
- 17…先端トンネルロボット内圧力センサ
- 18…地上基準圧力センサ
- 19…測定基準面

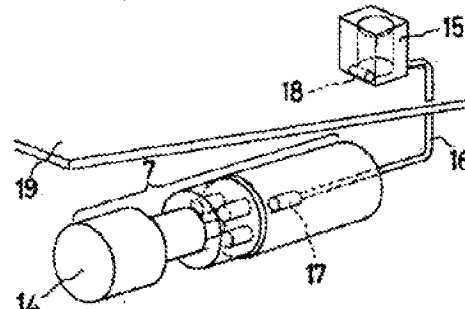
【図2】



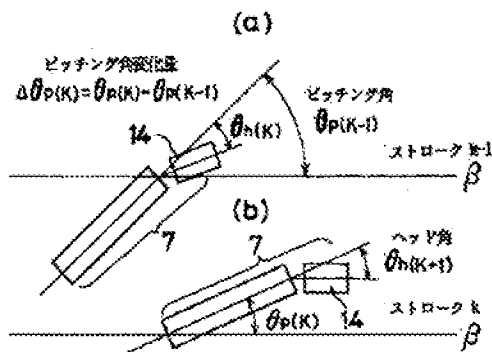
【図1】



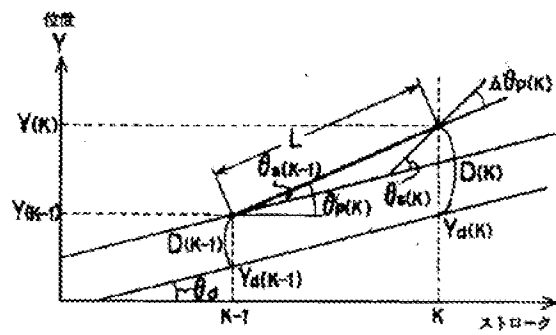
【図3】



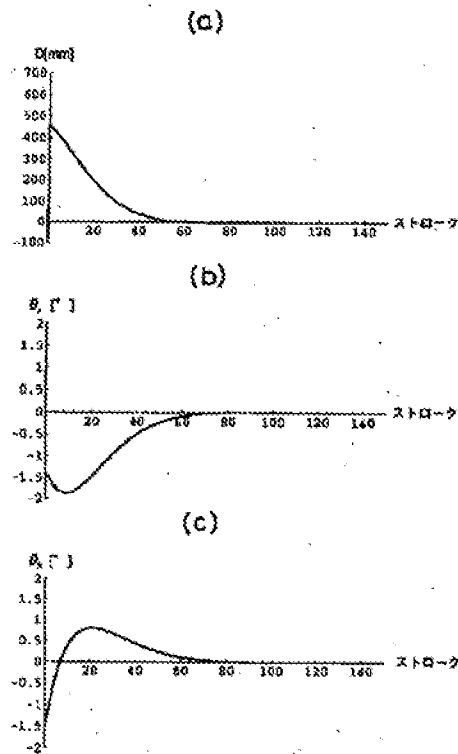
【図4】



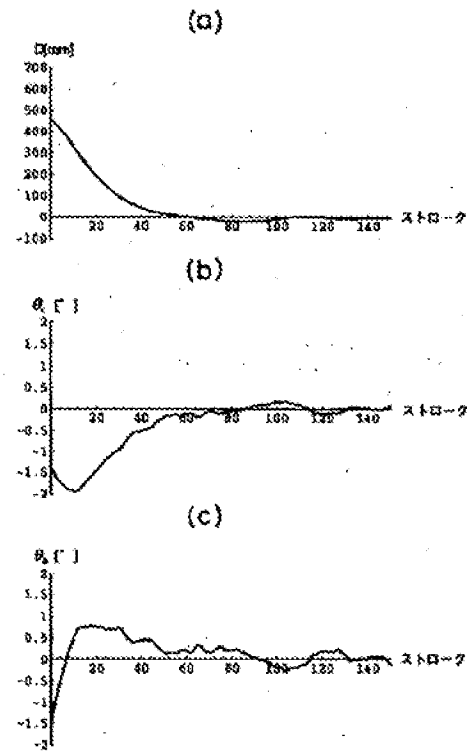
【図5】



【図6】



【図7】



フロントページの続き

(72)発明者 藪田 哲郎  
東京都千代田区内幸町1丁目1番6号 日  
本電信電話株式会社内